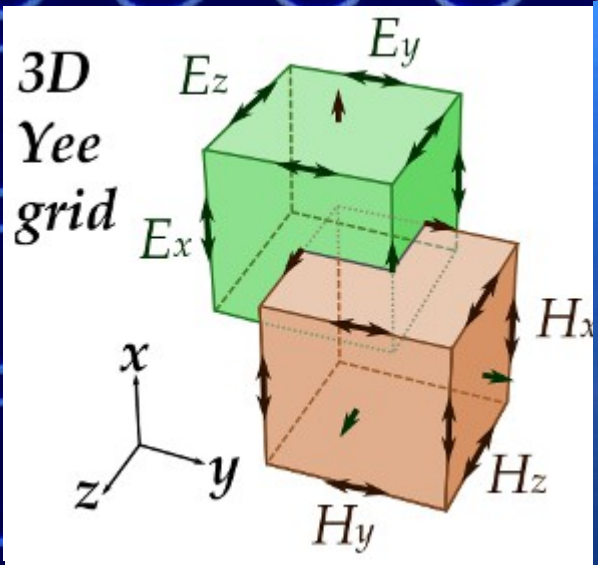
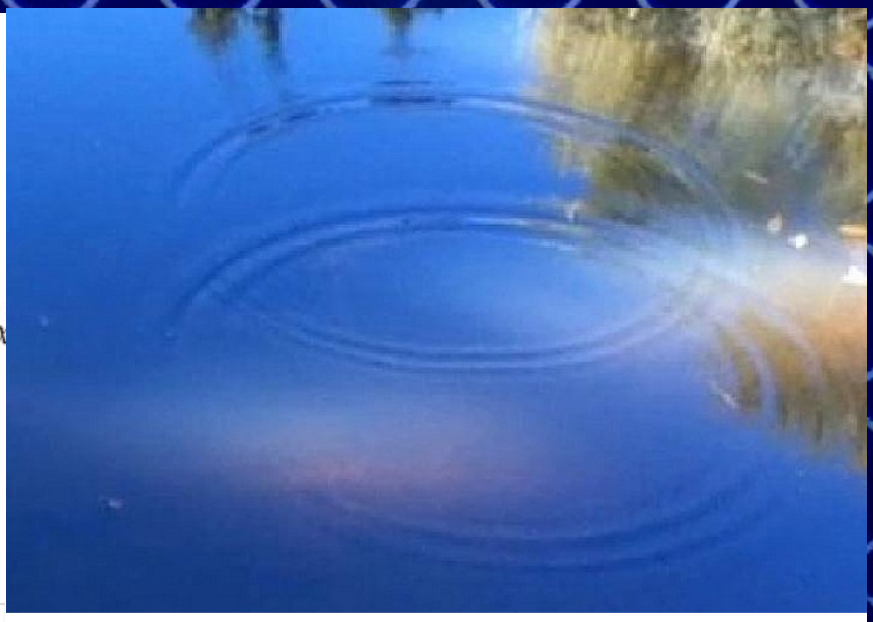
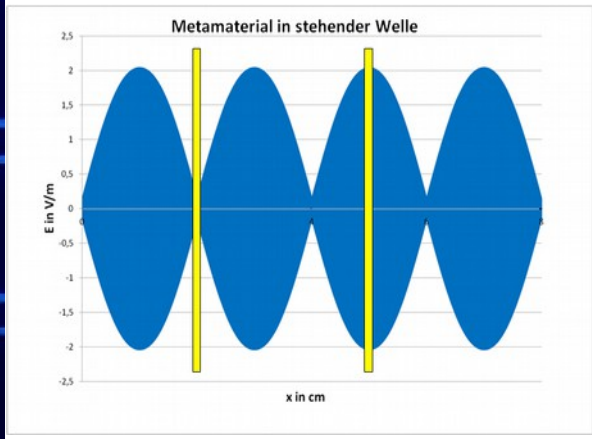
Welle schaltet Welle

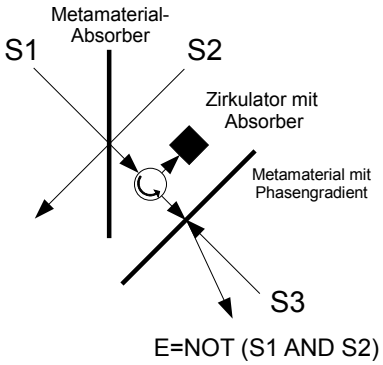
Simulationen und Experimente mit linearen Bauelementen für die optische Datenverarbeitung

Jugend forscht 2016

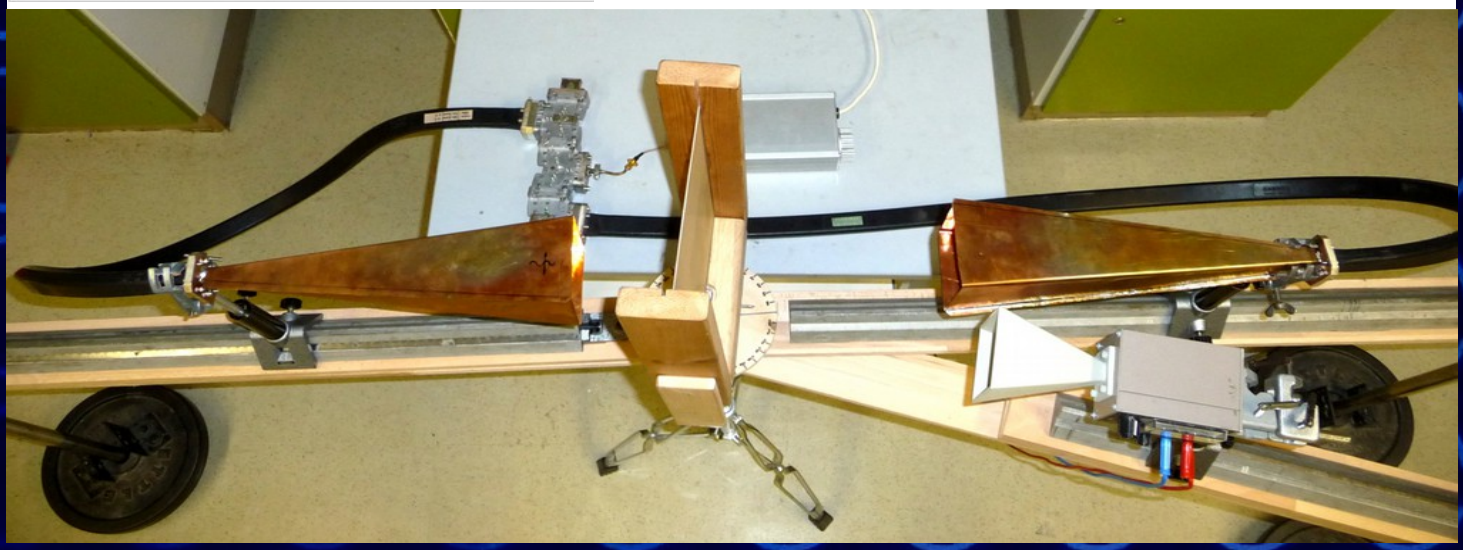








S1	S2	E=NOT (S1 AND S2)
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0



Adrian Lenkeit, Marvin Lohaus, Max Oehmichen

St. Michael-Gymnasium Bad Münstereifel

Gliederung

1. Kurzfassung …. 2
2. Zielsetzung …. 2
3. Grundidee …. 2
4. Stand der Forschung und unsere Experimente …. 3
5. Entwurf und Simulation von Logikgattern auf der Basis von Metamaterialien …. 3
6. Bau der Versuchsapparatur …. 8
7. Experimente mit Mikrowellen …. 10
   7.1 Welle schaltet Wellenintensität (AND-Gatter) …. 10
   7.2 Welle schaltet Wellenausbreitungsrichtung (XOR- und NOT-Gatter) …. 13
   7.3 Welle schaltet Wellenpolarisation (XOR-Gatter) …. 14
   7.4 Absorber-Metamaterial im Bauch ….15
   7.5 Interferenz an einer Glasplatte ….16
8. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse …. 17
9. Kritische Analyse …. 17
10. Danksagung …. 17
11. Literatur- und Linkliste …. 17

1. Kurzfassung

Die optische Datenverarbeitung hat gegenüber der elektronischen Datenverarbeitung viele Vorteile. Sie ermöglicht eine hohe Bandbreite und eine schnellere Übertragungsgeschwindigkeit der Daten. Momentan basiert sie jedoch noch auf nichtlinearen Materialien, die teuer in der Produktion sind und starke Laser zum Arbeiten benötigen. Die nichtlineare optische Datenverarbeitung ist damit äußert kostspielig.

Wir sind jedoch aufgrund unserer Forschungen in der Lage lineare Materialien zu verwenden, welche viel geringere Herstellungskosten aufweisen, keine hohe Intensität benötigen und damit energieeffizienter sind. Die gegenseitige Beeinflussung von Wellen mit Wellen sollte nach dem Superpositionsprinzip eigentlich nicht möglich sein. Mithilfe von stehenden Wellen und unseren linearen Materialien gelingt es uns trotzdem, eine Welle mit einer Welle zu schalten. Um unsere theoretischen Überlegungen zu überprüfen, entwickelten wir neuartige optische Logikgatter, die auf der Basis von Mikrowellen schalten. Diese simulierten wir zuerst mit einem selbst geschriebenen Programm auf Basis der Maxwell-Gleichungen und überprüften sie dann mit Erfolg in mehreren Experimenten.

Die unserem Projekt zugrunde liegende Idee ist leicht zu verstehen. Strahlt man ein Material mit einer elektromagnetischen Welle an, so beeinflusst das Material die ausfallende Welle, z.B. in ihrer Intensität. Strahlt man das Material jedoch mit einer zweiten elektromagnetischen Welle an, sodass es im Knoten der resultierenden stehenden Welle steht, verliert das Material seine Wirkung und beeinflusst die ausfallende Welle nicht mehr. Dieses Verhalten erlaubt den Bau von Logikgattern.

2. Zielsetzung

In unserer Forschungsarbeit haben wir uns als Ziel gesetzt, die optische Datenverarbeitung im Bereich von Mikrowellen mithilfe von linearen Materialien zu ermöglichen. Die elementaren Bausteine der optischen Datenverarbeitung sind, wie in der elektronischen Datenverarbeitung auch, Logikgatter, jedoch auf optischer Basis. Deshalb müssen wir Logikgatter entwickeln und bauen, die von elektromagnetischen Wellen und nicht vom elektrischen Strom geschaltet werden, aber trotzdem noch die grundlegenden logischen Operatoren ausführen können. Da jedoch nach dem Superpositionsprinzip zwei Wellen sich gegenseitig nicht beeinflussen können, sie aber in unseren Logikgattern miteinander wechselwirken müssen damit ein Informationsaustausch stattfinden kann, brauchen wir eine Möglichkeit, um das Superpositionsprinzip zu umgehen.

3. Grundidee

„Die Ausbreitung von Licht in Materie wird durch die beiden frequenzunabhängigen optischen Konstanten, die Brechzahl n und den Absorptionskoeffizienten α beschrieben. In der normalen, linearen Optik sind diese Größen unabhängig von der Intensität des einfallenden Lichtes. …… Daraus folgen zwei wichtige Prinzipien, die überall in der linearen Optik benutzt werden: Das Superpositionsprinzip und die Erhaltung der Frequenz“ [3.1, Seite 841]. D.h., dringen zwei Lichtwellen in ein lineares Medium wie zum Beispiel Glas ein, so überlagern sie sich, stören aber ihre gegenseitige Ausbreitung nicht. Die Elektronen des Mediums verhalten sich hier wie harmonische Oszillatoren, die vom Licht zum Mitschwingen angeregt werden und wieder Licht der gleichen Frequenz aussenden. Bei nichtlinearen Medien wie zum Beispiel Kristallen mit piezoelektrischen Eigenschaften (Lithiumniobat, Beta-Bariumborat, …) und starker Lasereinstrahlung verhalten sich die Elektronen nicht mehr wie harmonische Oszillatoren. Es gilt hier weder das Superpositionsprinzip noch das Prinzip von der Erhaltung der Frequenz. Mittels solcher nichtlinearer Medien und starken Lasern kann man also die Ausbreitung von Licht mittels Licht beeinflussen. D.h., man kann elektromagnetische Wellen mittels elektromagnetischer Wellen beeinflussen. In unserer Arbeit werden wir aber zeigen, dass man auch mit linearen Medien und Strahlung geringer Intensität elektromagnetische Wellen mithilfe von elektromagnetischer Wellen beeinflussen kann.

Die Grundidee unseres Projekt ist leicht zu verstehen. So lässt sich zum Beispiel mit zwei gleichen

Mikrowellensendern eine stehende Welle erzeugen. Stellt man in den Knoten dieser stehenden Welle ein Medium, welches dünn im Vergleich zur Wellenlänge der verwendeten Mikrowellen ist, so werden die Elektronen in diesem Medium nicht zu Schwingungen angeregt, da im Knoten der stehenden Welle kein elektrisches Feld vorhanden ist. Schaltet man jedoch einen Sender aus, so beginnen die Elektronen, angeregt durch den anderen Sender, in diesem Medium zu schwingen und senden selber eine Welle aus. Mithilfe von selbst erstellten Simulationen und selbst geätzten linearen Metamaterialien können wir die hiermit verbundenen Effekte zeigen. D.h., wir können die Absorption, die Reflexion und Brechung und die Polarisationsänderung von elektromagnetischen Wellen durch ein lineares Metamaterial gezielt mit einer zweiten elektromagnetischen Welle beeinflussen. Wir benötigen also keine leistungsstarken Laser und keine kostspieligen nichtlinearen Materialien und schaffen somit die Voraussetzung für den Bau von energieeffizienten und preiswerten Komponenten für die optische Datenverarbeitung.

4. Stand der Forschung und unsere Experimente

Der Bau von photonischen Logikgattern (NOT, OR, AND, NAND, XOR, …) ist bedeutsam für die zukünftige Entwicklung von optischen Computern und Quantencomputern. Aus diesem Grund wird an der Licht-Licht-Wechselwirkung in optisch nichtlinearen Materialien seit Jahren intensiv und erfolgreich geforscht. D.h., man kann mit starken Lasern die Ausbreitung von Licht in nichtlinearen Materialien mit Licht beeinflussen und somit Daten verarbeiten. Als Beispiel sei hier nur die Arbeit von Denz, C. und Weilnau, C. aufgeführt: „Räumliche optische Solitonen – Licht steuert Licht Nichtlineare optische Materialien bieten zukunftsweisende Perspektiven für die optische Informationsverarbeitung“ [4.1].

Aber auch mit linearen Materialien sind seit wenigen Jahren erste Erfolge erzielt worden. J. Zhang u.a. führten 2012 Absorptionsexperimente mit kohärenten Lichtwellen (λ = 632,8 nm) durch, die sie auf ein Metamaterial, bestehend aus einem 50 nm dicken Goldfilm mit Splitring-Schlitzen, schickten [4.2]. Bei unseren Experimenten benutzen wir jedoch invertierte Metamaterialstrukturen bei einer 50.000-mal größeren Wellenlänge. Solche Experimente sind uns aus der Literatur nicht bekannt.

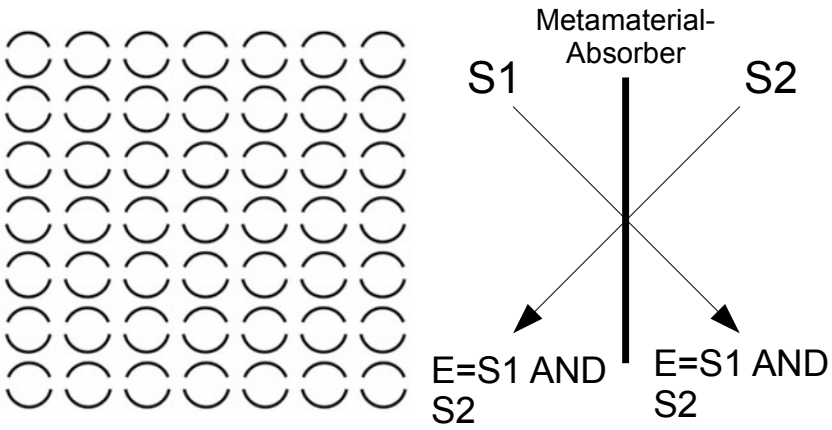
Versuche mit Metamaterialien mit Phasengradient und EINER einfallenden Welle wurden erstmals 2011 bei einer Wellenlänge von etwa 8 µm getestet [4.3]. Die Idee, diesen Effekt mit 2 einfallenden Wellen zu testen wurde aber bisher nur im optischen Bereich SIMULIERT [4.4]. Wir haben nun das erste erfolgreiche EXPERIMENT mit zwei einfallenden Wellen durchgeführt.

Die Idee, die Polarisation einer Welle mit einer anderen Welle zu beeinflussen wurde schon einmal mit einem Mikrowellenmetamaterial getestet. Wir zeigen nun zum ersten Mal, dass man hier auch ein einfaches Hertzsches Gitter verwenden kann. Das Gitter hat den Vorteil, dass es breitbandig ist.

5. Entwurf und Simulation von Logikgattern auf der Basis von Metamaterialien

Um eine optische Datenverarbeitung zu ermöglichen müssen wir in der Lage sein, jegliche Art von logischen Operationen auf unsere Daten anzuwenden. Dazu benötigen wir optische Logikgatter, in unserem Fall also Logikgatter, die nicht auf Elektrizität basieren, sondern mit Mikrowellen arbeiten können. Ein NAND-Gatter ist funktionell vollständig [5.1]. D.h., durch gezielte Kombination von mehreren NAND-Gattern miteinander kann jede logische Operation dargestellt werden. Deshalb reicht es prinzipiell aus, ein auf Mikrowellen basierendes NAND-Gatter zu entwickeln, womit dann eine optische Datenverarbeitung möglich ist.

Das NAND-Gatter selbst besteht aus einem AND-Gatter, dessen Ausgang durch ein NOT-Gatter invertiert wird. Finden wir also eine Möglichkeit, diese beiden Gatter auf Mikrowellenbasis zu implementieren, so ist uns auch der Bau des NAND-Gatters möglich.

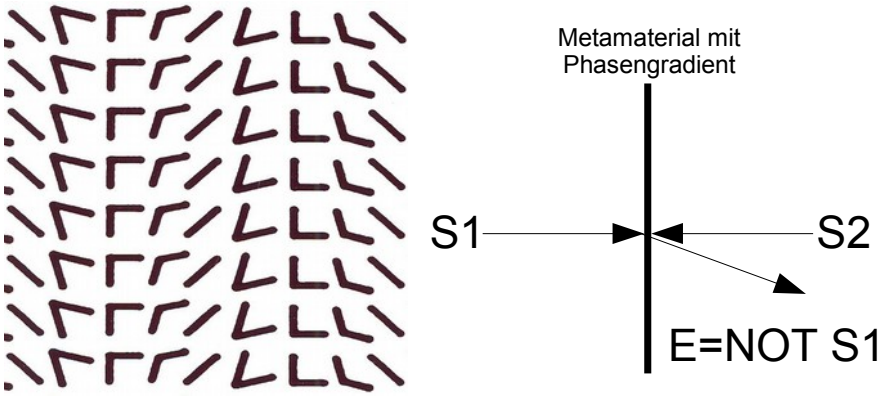


S1	S2	E=S1 AND S2
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Abb. 5.1: ***AND-Gatter*** *- Struktur des Absorber Metamaterials (links), Aufbauskizze des AND-Gatters (Mitte) und die dazugehörige Logiktabelle (rechts).*

Aus unserer Grundidee folgt, dass wir zum Bau eines AND-Gatter ein Material benötigen, dass normalerweise einfallende Mikrowellen absorbiert, im Knoten einer stehenden Welle jedoch seine absorbierende Wirkung verliert. Das Ziel ist, diese Absorption durch die Wellen zu steuern.

Die stehende Welle, und damit das „Verschwinden“ der Absorption am Wellenknoten, entsteht nur, wenn beide Eingangssignale, erzeugt von Sender 1 (S1) und Sender 2 (S2), eingeschaltet sind. Das Ausgangssignal beim Empfänger E ist maximal, wenn keine Absorption herrscht. Nur wenn also beide Eingangssignale vorhanden sind, ist so auch ein nennenswertes Ausgangssignal vorhanden, was einem AND-Gatter entspricht (siehe Abb. 5.1). Als absorbierendes Material eignet sich das Splitring-Metamaterial aus [5.2]. Dieses absorbiert im Idealfall 50% einer einfallenden Welle und reflektiert sowie transmittiert jeweils 25% der Welle. Vergleicht man die Fälle mit einer einfallenden Welle (mit Absorption) und zwei einfallenden Welle (keine Absorption am Knoten der stehenden Welle), so besteht nach der Wechselwirkung mit dem Metamaterial ein Intensitätsunterschied um den Faktor 4, welcher groß genug ist, um zwischen den beiden logischen Werten zu unterscheiden.



S1	E=NOT S1
0	1
1	0

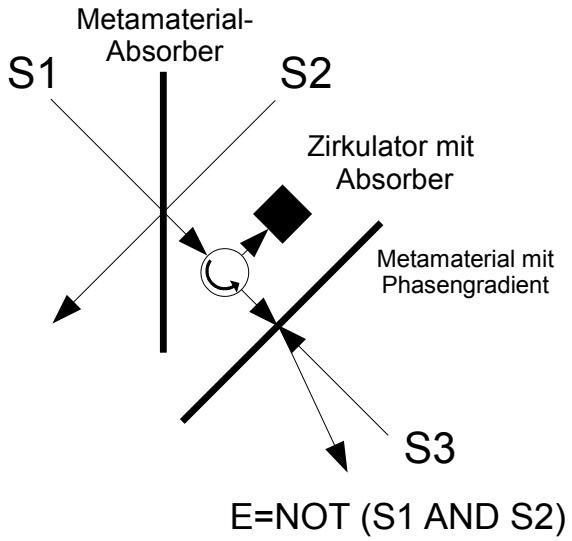
Abb. 5.2: ***NOT-Gatter*** *- Struktur des Phasengradient-Metamaterials (links), Aufbauskizze des NOT-Gatters (Mitte) und die dazugehorige Logiktabelle (rechts).*

Einen ähnlichen Ansatz verwenden wir auch zum Bau unseres NOT-Gatters. Anstatt eines absorbierenden Materials nehmen wir jedoch ein Material, welches Mikrowellen mit einem Phasengradient reflektiert und bricht [4.3]. Die Reflexion und Brechung kann dann durch die einfallenden Wellen kontrolliert werden.

Wenn das Metamaterial im Knoten der stehenden Welle platziert ist und die einfallende Welle von S2 dauerhaft aktiv gehalten wird, ist die ausfallende Welle nur vorhanden, wenn S1 nicht sendet (siehe Abb. 5.2). Dies entspricht dem Verhalten eines NOT-Gatters. Wir benutzen ein Phasengradient-Metamaterial, welches die einfallende Welle gleich stark bricht und reflektiert. Außerdem dreht das Phasengradient-

Metamaterial die Polarisationsebene der relevanten ausfallenden Wellen um 90°.

Durch Verbinden des AND- und des NOT-Gatters kann nun, zusammen mit einem Sender S3, ein NAND-Gatter realisiert werden (Abb. 5.3).



S1	S2	E=NOT (S1 AND S2)
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Abb. 5.3: ***NAND-Gatter*** *- Aufbau des NAND-Gatters (links) mit der dazugehörigen Logiktabelle (rechts). Der Sender S3 sendet immer.*

Der Absorber und der Phasengradient stören sich dabei nicht, da durch die Drehung der Polarisationsebene der ausfallenden Welle aufgrund des Phasengradienten-Metamaterials um 90° keine Interferenzen auftreten, die das Ergebnis des NAND-Gatters verfälschen. Dazu muss jedoch auch die ausfallende Welle in der gedrehten Polarisationsebene gemessen werden. Der Zirkulator in Abbildung 5.3 verhindert, dass die Messung durch Rückreflexionen gestört werden.

Um unsere theoretischen Überlegungen zu überprüfen, wollten wir, bevor wir mit den Experimenten beginnen, Computersimulationen zu den Metamaterial-Logikgattern durchführen. Da wir mit Mikrowellen, also mit elektromagnetischen Wellen arbeiten, müssen wir das elektromagnetische Feld simulieren.

Das elektromagnetische Feld wird vollständig von den Maxwell-Gleichungen beschrieben, es müssen somit Lösungen für die Maxwell-Gleichungen gefunden werden. Dies ist bei komplexen Systemen jedoch nicht mehr analytisch, sondern nur noch näherungsweise möglich. Hierfür eignet sich die Finite-Difference-Time-Domain Methode (kurz FDTD). Diese basiert darauf, den zu simulierenden Raum in diskrete Untereinheiten mit einem endlichen Volumen zu unterteilen, in denen das elektrische bzw. magnetische Feld als konstant angenommen wird. Die Maxwell-Gleichungen lassen sich dann auf diese Untereinheiten anwenden, wodurch Rückschlüsse auf die zeitliche Änderung der Felder gezogen werden können, womit die zeitliche Entwicklung des Systems simuliert werden kann. Die

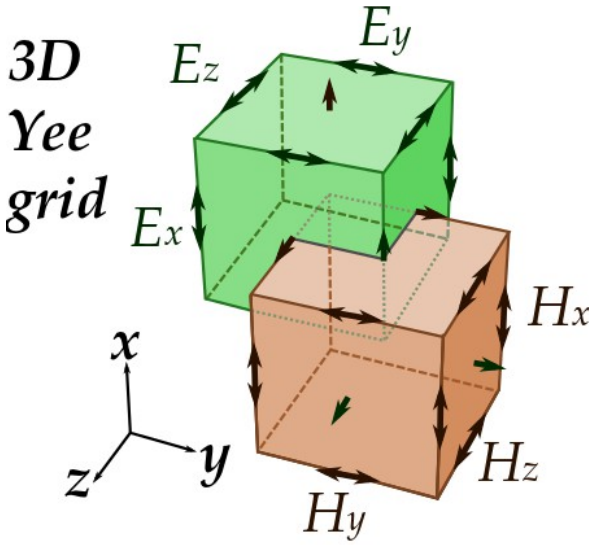


Abb. 5.4: ***FDTD-Simulationen -*** *Das E- und H-Feld sind räumlich, wie abgebildet, sowie zeitlich einen halben „Schritt“ verschoben. Dies gibt der Simulation numerische Stabilität und vereinfacht den Nabla-Operator. Veränderter Bildausschnitt aus Quelle [5.5].*

Eigenschaften des Raumes (Materials) in den Untereinheiten können beliebig verändert werden. Dadurch kann der Einfluss von verschiedensten Materialien auf die Felder in die Simulation einfließen. Die FDTD-Simulation hat dabei zusätzlich den Vorteil, dass sie konkrete Werte für das elektrische $\vec{E}$ und magnetische Feld $\vec{H}$ an jedem Ort und Zeitpunkt liefert.

Die Maxwell-Gleichungen in der Anwesenheit von Materie unter Berücksichtigung von Polarisationseffekten lauten (magnetische Flussdichte $\vec{B}$, elektrische Flussdichte $\vec{D}$, Materialpolarisation $\vec{P}$)

$$\vec{\nabla}\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (1) \qquad \vec{\nabla}\times\vec{H}=\frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (2) \qquad \vec{H}\stackrel{\text{def}}{=}\frac{1}{\mu_0\mu_r}\vec{B} \quad (3) \qquad \vec{D}\stackrel{\text{def}}{=}\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}+\vec{P} \quad (4)$$

Die partiellen Ableitungen (1),(2) werden durch zentrale Differenzen angenähert, wobei das E- und das H-Feld zeitlich um einen halben Zeitschritt Δt und räumlich um eine halbe Zellenlänge Δz verschoben sind. Dies ist die der FDTD-Simulation zu Grunde liegende Idee [5.3] (siehe Abb. 5.4). Die Gleichungen sind hier nur unter Betrachtung eines Raumes mit einer Welle, die sich in Z-Richtung ausbreitet, dargestellt, da die Gleichungen in drei Dimensionen hier zur Darstellung zu groß sind. Ihre Herleitung folgt jedoch dem selben Prinzip.

$$\frac{B_x\big|^{i}_{t+\Delta\frac{t}{2}}-B_x\big|^{i}_{t-\Delta\frac{t}{2}}}{\Delta t}=-\frac{E_y\big|_{t}^{i+\frac{\Delta z}{2}}-E_y\big|_{t}^{i-\frac{\Delta z}{2}}}{\Delta z} \quad (5) \qquad \frac{D_y\big|_{t+\Delta t}^{i+\frac{\Delta z}{2}}-D_y\big|_{t}^{i+\frac{\Delta z}{2}}}{\Delta t}=-\frac{H_x\big|^{i+\Delta z}_{t+\Delta\frac{t}{2}}-H_x\big|^{i}_{t+\Delta\frac{t}{2}}}{\Delta z} \quad (6)$$

Die durch zentrale Differenzen angenäherten Gleichungen (5) und (6) werden dann nach dem zukünftigen Wert des Feldes umgestellt.

$$B_x\big|^{i}_{t+\Delta\frac{t}{2}}=B_x\big|^{i}_{t-\Delta\frac{t}{2}}-\left(E_y\big|_{t}^{i+\frac{\Delta z}{2}}-E_y\big|_{t}^{i-\frac{\Delta z}{2}}\right)\frac{\Delta t}{\Delta z} \quad (7) \qquad D_y\big|_{t+\Delta t}^{i+\frac{\Delta z}{2}}=D_y\big|_{t}^{i+\frac{\Delta z}{2}}-\left(H_x\big|^{i+\Delta z}_{t+\Delta\frac{t}{2}}-H_x\big|^{i}_{t+\Delta\frac{t}{2}}\right)\frac{\Delta t}{\Delta z} \quad (8)$$

Es fehlt noch die Berechnung der Materialpolarisierung $\vec{P}$, womit die Frequenzabhängigkeit der Materialeigenschaften in die Simulation einfließt, welche zur korrekten Simulation von unseren Metamaterialien berücksichtigt werden muss. Die Materialpolarisierung wird dazu nach dem Lorentz-Drude Modell dargestellt [5.4]. Im Lorentz-Drude Modell wird angenommen, dass die Polarisationseffekte durch Verschieben der Elektronen des Materials aufgrund des externen elektrischen Feldes auftreten. Die Elektronen sind dabei an den Atomkern gebunden. So entsteht ein harmonischer Oszillator, wobei f die Stärke der rücktreibenden Kraft ist, ω_0 die Eigenfrequenz, ω die Frequenz der externen elektromagnetischen Welle, ω_p die Plasmafrequenz des Materials und Γ die Dämpfung der Schwingung.

$$\vec{P}(\omega)=\omega_p^2\vec{E}(\omega)\frac{f}{\omega_0^2-\omega^2+j\omega\Gamma} \quad (9)$$

Die Gleichung befindet sich jedoch in der Frequenzdomäne, während für die FDTD die zeitliche Domäne benötigt wird. Umschreiben von Gleichung (9) in die zeitliche Domäne ergibt

$$\frac{\partial\vec{P}(t)^2}{\partial t^2}+\frac{\partial\vec{P}(t)}{\partial t}\Gamma+\omega_0^2\vec{P}(t)=f\,\omega_p^2\vec{E}(t) \quad (10)$$

In Gleichung (10) befindet sich noch ein partielles Differential zweiter Ordnung, welches durch Einführung eines Hilfsfeldes $\vec{J}$, das den Verschiebungsstrom beschreibt, entfernt wird, da ansonsten die zentralen Differenzen nicht direkt angewendet werden können.

$$\vec{J}(t)=\frac{\partial\vec{P}(t)}{\partial t} \quad (11)$$

Einsetzten von Gleichung (11) in Gleichung (10) ergibt

$$\frac{\partial \vec{J}(t)}{\partial t}+\vec{J}(t)\Gamma+\omega_0^2\vec{P}(t)=f\,\omega_p^2\vec{E}(t) \quad (12)$$

Zuletzt wird Gleichung (12) durch zentrale Differenzen angenähert.

$$J_z\big|^i_{t+\Delta\frac{t}{2}}=\left[\frac{2-\Gamma|^i\Delta t}{2+\Gamma|^i\Delta t}\right]J_z\big|^i_{t-\Delta\frac{t}{2}}-\left[\frac{2\,\omega_0^2|^i\Delta t}{2+\Gamma|^i\Delta t}\right]P_z\big|^i_t+\left[\frac{2f|^i\Delta t}{2+\Gamma|^i\Delta t}\right]E_z\big|^i_t \quad (13)$$

Dies sind alle Gleichungen, die für unsere Simulationen benötigt werden. Durch wiederholtes Anwenden der Gleichungen (1) bis (13) auf den Simulationsraum kann nun die zeitliche Entwicklung des elektromagnetischen Feldes simuliert werden.

Die Implementation der FDTD-Simulationen erfolgte in C++ nach den Gleichungen (1) bis (13), jedoch erweitert von einer Dimension auf drei Dimensionen. Die Darstellung erfolgt als eine aus dem Simulationsvolumen herausgeschnittene, entlang der X- und Y-Achse aufgespannte Ebene. Farblich dargestellt ist das $\vec{E}$-Feld entlang der Z-Achse. Positive Werte erzeugen dabei eine rote Färbung, negative Werte eine blaue Färbung. Nullwerte sind schwarz dargestellt. Als Frequenz der Sender benutzten wir in der Simulation 9,75 GHz.

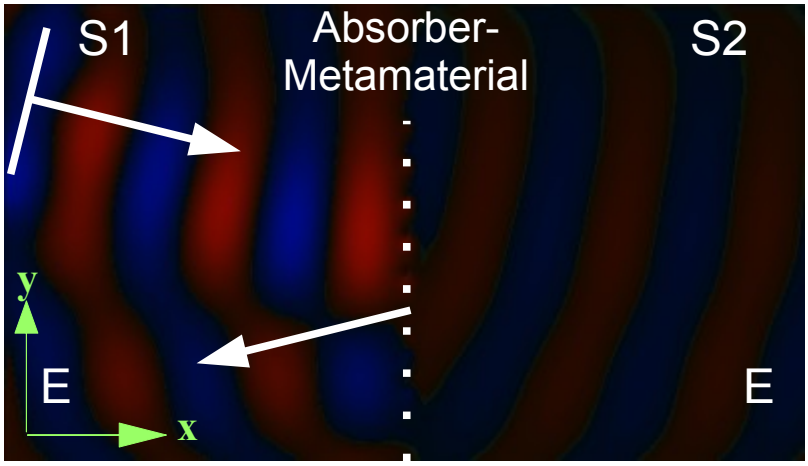


*Abb. 5.5: **Ein Sender** - Einfallende Welle von links mit Absorption, Transmission und Reflexion. S2 sendet nicht.*

Mit unserem selbstgeschriebenen Simulationsprogramm wollten wir das Verhalten des AND-Gatters reproduzieren. Dazu simulierten wir zuerst das Auftreffen einer einzelnen einfallenden Welle auf das Absorber-Metamaterial (Abb. 5.5). In der Simulation ist das Absorber-Metamaterial eine 1,5 mm dicke FR4-Epoxydplatine (ε_r von 4,1 bei 10 Ghz), in deren 35µm dicke Kupferschicht die Absorberstruktur geätzt wird. Dies entspricht einem Absorber-Metamaterial, wie wir es für unsere Experimente auch herstellen können. Dabei verhält sich der Absorber unserer Simulation ähnlich dem Idealfall und absorbiert 50% der einfallenden Welle und reflektiert und transmittiert jeweils 25% der Welle.

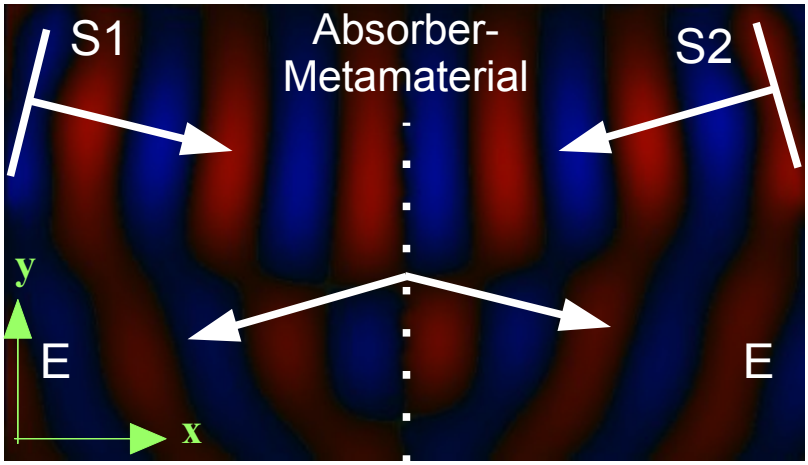


*Abb. 5.6: **Zwei Sender** - Zwei einfallende Wellen mit resultierenden ausfallenden Wellen. Das Metamaterial steht im Knoten der stehenden Welle.*

Sind beide Sender eingeschaltet (Abb. 5.6), wodurch eine stehende Welle zwischen *S1* und *S2* entsteht, so haben die ausfallenden Wellen, gemessen an *E*, fast die selbe Intensität wie die ursprünglich einfallenden Wellen. Die absorbierende Eigenschaft des Absorber-Metamaterials fällt im Knoten der stehenden Welle also weg, weshalb die reflektierten und transmittierten Wellen nicht an Intensität verlieren. Unser Absorber AND-Gatter funktioniert also in den Simulationen.

An der Simulation des NOT-Gatters auf Basis des Phasengradient-Metamaterials arbeiten wir zur Zeit noch, erhoffen uns hier jedoch ähnliche Ergebnisse.

6. Bau der Versuchsapparatur

Das erste Experiment, welches wir mit unseren selbst hergestellten Metamaterialien durchführen wollten, war ein Mikrowellenexperiment zur Absorption. Dabei sollte durch zwei Mikrowellensender eine stehende Welle erzeugt werden. In diese stehende Welle sollte dann unser Metamaterial geschoben werden.

Wir sollten keine Absorption messen können, wenn sich unser Metamaterial in einem Knoten der stehenden Welle befindet. Schaltet man jedoch eine Sendeantenne aus, so ist keine stehende Welle mehr vorhanden und das Metamaterial absorbiert wieder.

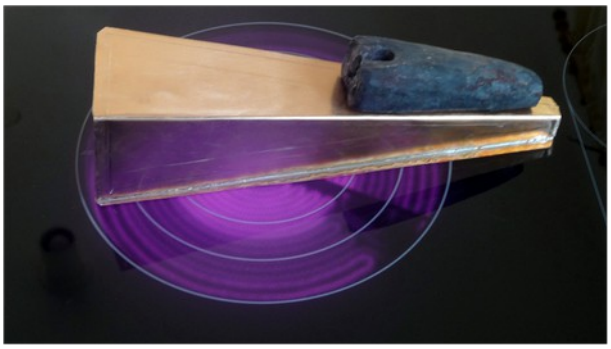


Abb. 6.1: ***Antennenbau*** *- Löten der Kupferhörnchen auf einem Cerankochfeld. Der obere Kupferwinkel wurde mit einem Eisenkeil aus einem alten Bügeleisen beschwert.*

Das Experiment hörte sich in der Theorie simpel an, war jedoch in der Praxis schwerer umzusetzen als zunächst gedacht. Für exakte Messergebnisse braucht man zwei Mikrowellensender mit exakt der gleichen Frequenz, da nur so eine störende Schwebung verhindert werden kann. Da uns in der Schule aber nur ein Mikrowellensender zur Verfügung stand, versuchten wir zuerst eine stehende Welle durch Reflexion an einer Metallplatte zu erreichen. Der daraus entstehende kompliziertere Versuchsaufbau lieferte aber keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Konkrete Hilfe erhielten wir auf Anfrage von einem Mitarbeiter des Astropeilers auf dem Stockert bei Eschweiler. Er stellte uns freundlicherweise einen Frequenzgenerator, einen Strahlteiler und zwei flexible Hohlleiter zur Verfügung (siehe Abb. 6.2). Was uns jetzt noch fehlte waren zwei passende Sendeantennen, im folgenden Text kurz „Hörnchen“ genannt. Diese Hörnchen in Form eines Pyramidenstumpfes wollten wir aus Kupferblech bauen. Hierbei mussten wir berücksichtigen, dass die Seitenlänge a_G der Grundfläche des Pyramidenstumpfes ein Vielfaches n von der Wellenlänge λ ergeben muss und die Höhe h das Vierfache von der Seitenlänge a_G der Grundseite. Weiterhin muss die obere Fläche auf den Ausgang der Hohlleiter passen. In Formeln ausgedrückt:

$$a_G = n * \lambda \qquad h = 4 * a_G$$

Weiterhin steigt die Ausgangsintensität der Wellen mit der Länge der Hörnchen. Jedoch konnten wir diese nicht zu groß planen, da der fertige Versuchsaufbau nicht zu groß werden durfte. Schließlich entschieden wir uns für n = 3. Dadurch ergab sich für λ, a_G und h bei f = 10,5 GHz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3*10^8\,\mathrm{m*s^{-1}}}{10{,}5*10^9\,\mathrm{Hz}} = 2{,}86\,\mathrm{cm}$$

$$a_G = 3*2{,}86\,\mathrm{cm} = 8{,}58\,\mathrm{cm} \qquad h = 4*8{,}58\,\mathrm{cm} = 34{,}32\,\mathrm{cm}$$

Nach der Berechnung bauten wir zuerst einen Prototyp aus Karton und Alufolie. Da die Vorversuche hiermit erfolgreich waren, begannen wir mit dem Bau der Endprodukte aus Kupfer. Entsprechend der von uns gezeichneten Abwicklung kamen zwei Bauweisen für die Endprodukte in Frage. Wir konnten entweder die einzelnen Seiten alle separat aneinander löten, oder jeweils zwei Seiten im rechten Winkeln zueinander kanten, um so nur zweimal zu löten. Wir kamen zu dem Entschluss, dass mehrfaches Löten zu Ungenauigkeiten führen würde, weshalb wir uns für die zweite Variante entschieden. Das Zusammenlöten der relativ großen Kupferbleche mit unserem Lötkolben versprach keinen Erfolg. So entschieden wir uns, die Kupferwinkel zu Hause auf einem Cerankochfeld gleichmäßig zu erwärmen und so zu löten (siehe Abb. 6.1).

Nachdem nun die fertigen Hörnchen auf den Hohlleitern aufsaßen, konnten wir die ersten Versuche durchführen. Intensitätsmessungen zeigten uns, dass unser Empfänger sein Empfangsmaximum nicht wie angegeben bei 10,5 GHz, sondern bei 9,9 GHz besitzt. Außerdem waren die Ausgangssignale der beiden Hörnchen nicht gleich stark. Diesen Intensitätsunterschied konnten wir bei unseren Versuchen durch einen unterschiedlichen Abstand zum jeweiligen Metamaterial ausgleichen.

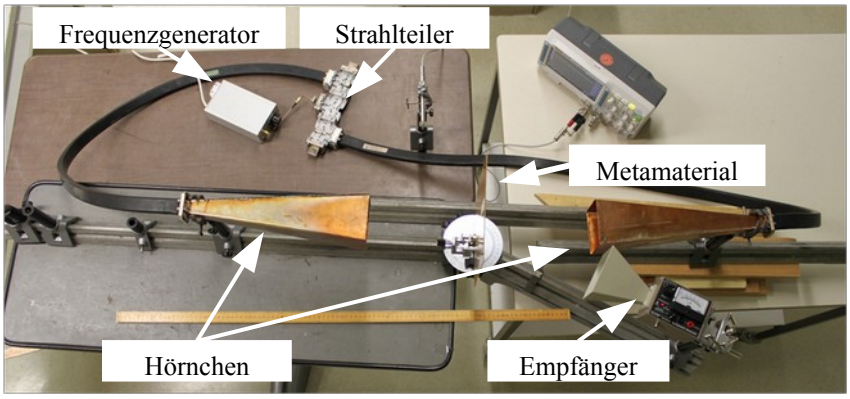


Abb. 6.2: ***Versuchsapparatur*** *- Erster Aufbau*

Unser in Abbildung 6.2 abgebildeter Versuchsaufbau war jedoch recht umständlich zu handhaben und lieferte nicht immer reproduzierbare Ergebnisse. Daher musste ein neuer Versuchsaufbau her, der besser und flexibler für unser Experiment ausgelegt war. Es war uns wichtig, dass neben anderen Eigenschaften auch eine gute Arbeitshöhe gewährleistet sein sollte. Das Wichtigste war jedoch, dass es ein flexibles Gestell sein musste, welches sich aus einer Achse mit drei daran befestigten Tragebarren zusammensetzt, die sich unabhängig voneinander drehen lassen und der Länge der optischen Schienen der Schule entsprechen. Ebenfalls musste sich in der Mitte der Achse eine Halterung für die Metamaterialien, sowie ein Winkelmesser befinden. Nach mehreren verworfenen Skizzen kamen wir endlich zu einem Entwurf, der alle unsere Anforderungen verwirklichen konnte. Jedoch musste dieser dann noch gebaut werden. Als Drehzentrum sollte ein Schlagzeugständer dienen, der dadurch, dass er neben seiner Stabilität auch höhenverstellbar ist, sich perfekt dafür eignete. In diesen Schlagzeugständer haben wir ein Metallrohr eingefügt, welches als Achse dient. In die Tragebarren, welche nach langen Diskussionen aus Holz bestehen sollten, haben wir ein Loch mit dem Durchmesser des Metallrohres gebohrt. Wegen der Größe des Loches musste mit einem Forstnerbohrer gearbeitet werden. An die jeweiligen äußeren Enden der Tragebarren wurde eine Gewindestange mit Kontakt zu einem auf dem Boden liegenden und mit einem Gewicht beschwerten Holzfuß angefertigt, um zusätzliche Stabilität zu erzielen. Aus ästhetischen Gründen wurden die notwendigen Muttern in dem Holz des Fußes versenkt und weitere Metallrohre zur Umschließung der Gewindestangen angefertigt. Oberhalb der drei Tragebarren wurde eine runde Holzscheibe aufgesetzt, welche mit einem Kreisschneider angefertigt wurde und als Winkelmesser dienen soll. Zwischen den einzelnen Tragebarren und dem Winkelmesser befinden sich Unterlegscheiben, um das unabhängige Drehen der Tragebarren voneinander zu gewährleisten. Auf das obere Ende der im Schlagzeugständer befindlichen

Abb. 6.3: ***Fertiges Gestell*** *für unsere Experimente*

Abb. 6.4: ***Erste Experimente*** *mit der neuen Apparatur*

Achse haben wir eine Halterung für das Metamaterial angebracht. Diese Apparatur ist frei drehbar und besitzt einen Nagel als Zeiger, sodass man den Drehwinkel ablesen kann. Unsere fertige Apparatur zeigen die Abbildungen 6.3 und 6.4. Da wir nun eine fertige Apparatur hatten und somit die Experimente beginnen konnten, widmeten mir uns diesen. Die ersten Experimente liefen auch schon deutlich besser als mit der vorherigen Apparatur und wir erzielten die gewünschten Ergebnisse. Jedoch waren die Werte nur schwer reproduzierbar und abhängig von vielen unterschiedlichen Faktoren. Um das Problem zu lösen, überlegten wir uns zuerst wie dieses entsteht: Das Problem ist, dass wir die Experimente hauptsächlich in der Schule durchführen und wir es dort viel mit Störsignalen durch reflektierende Oberflächen wie Tafeln zu tun haben, die die Ergebnisse verfälschen. Um dieses Problem zu lösen entwickelten wir eine Messkammer für elektromagnetische Wellen, die um die Apparatur gebaut ist und aus Absorberplatten besteht. Durch diese Messkammer können keine Störsignale in das System gelangen und es können auch keine austretenden Wellen reflektiert werden. Mit dieser neuen Messkammer waren die Ergebnisse nicht nur reproduzierbarer, sondern auch deutlicher und einfacher mit der grundlegenden Physik zu erklären. Da unsere Experimente mit der 10 GHz-Apparatur so erfolgreich waren, bauten wir die selbe Apparatur nochmal mit 20 GHz. Die gesamte Apparatur entspricht vom Volumen her einem Achtel der 10 GHz-Apparatur und passt somit auf ein einzelnes Holzbrett. Dabei war der Vorteil, dass wir die Gleitschienen fest auf das Holzbrett montieren konnten, was zusätzliche Stabilität gewährleistete.

7. Experimente mit Mikrowellen

7.1 Welle schaltet Wellenintensität (AND-Gatter)

Nachdem die Versuchsapparatur fertiggestellt war, konnten wir die Ergebnisse unserer Simulationen nun experimentell überprüfen. Als erstes überprüften wir das Verhalten der in Kapitel 5 simulierten Metamaterial-Absorberplatine. Dabei sollte es möglich sein, die Absorption der Mikrowellen experimentell so zu beeinflussen, dass ein AND-Gatter entsteht. Die dazu notwendige Metamaterial-Absorberplatine (siehe Abb. 7.1) mussten wir selber herstellen. Wir entschieden uns für ein Muster aus Kreisbögen entsprechend dem Paper [5.2], welches wir an unsere Frequenz anpassten.

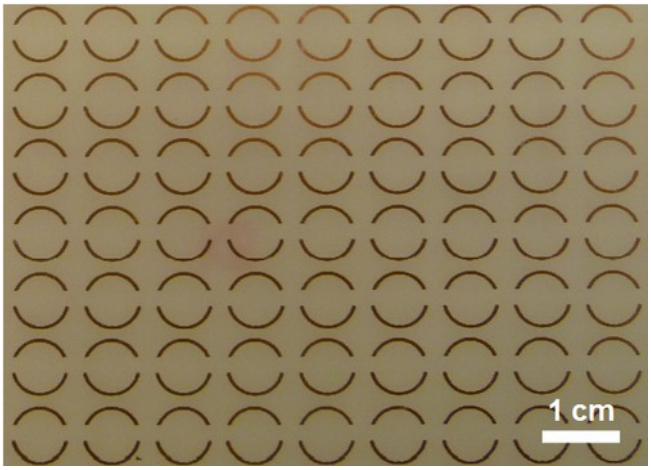


Abb. 7.1: ***Metamaterialabsorber*** *- Ausschnitt aus unserer Metamaterial-Absorberplatine bestehend aus Kupfer-Kreisbögen (35 µm Kupfer auf FR4-Epoxydplatine). Die Breite des Bildausschnittes entspricht 8 cm.*

Als erstes mussten wir die Frequenz bestimmen, bei der die Metamaterial-Absorberplatine sich annähernd ideal verhält, d.h. 50% der Wellenintensität absorbiert, 25% reflektiert und 25% transmittiert. Dazu haben wir die Reflexion und Transmission gemessen haben und hieraus die Absorption berechnet.

$A = 100 - T - R$, wobei A = Absorption (%), T = Transmission (%), R = Reflexion (%) ist.

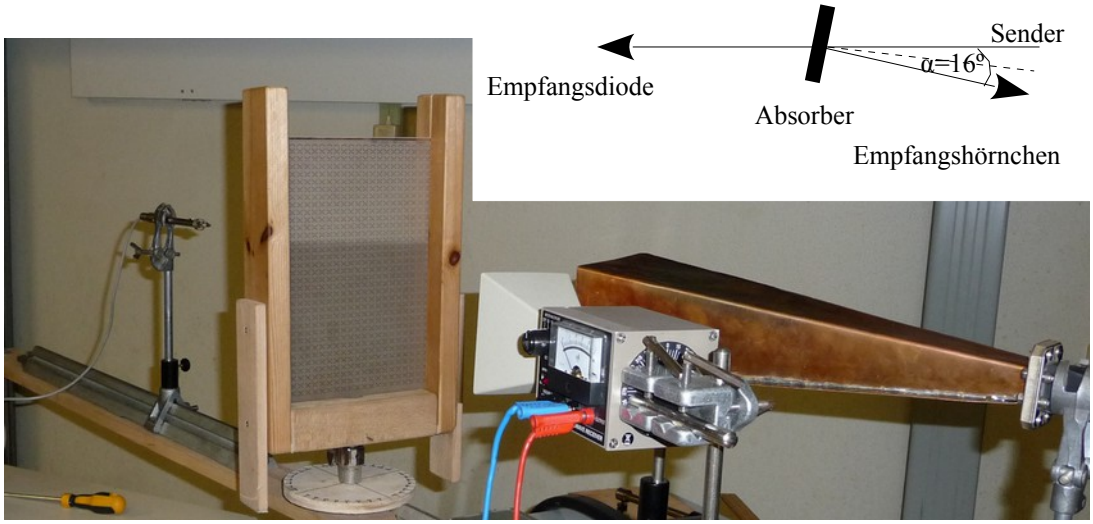
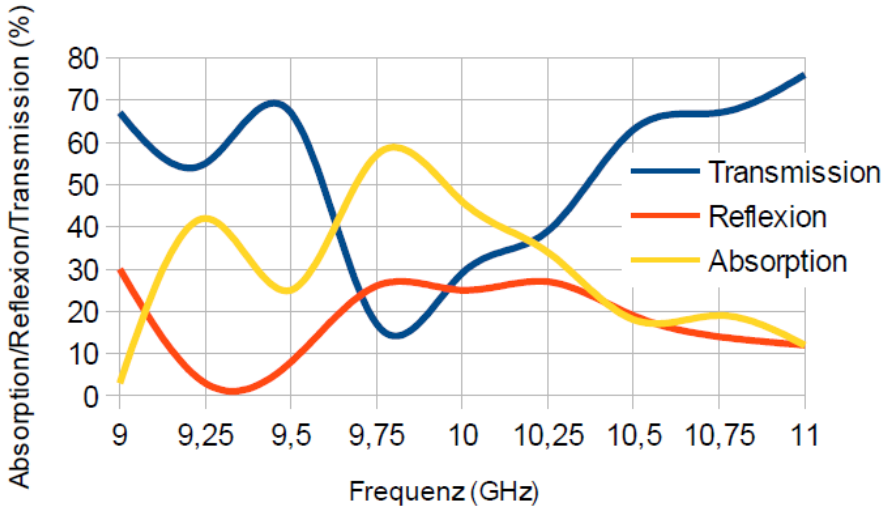


Abb. 7.2: **Absorptionsmessung** - *Versuchsaufbau zur Bestimmung der optimalen Absorptionsfrequenz mit einem Sender*

Die Absorberplatine steht wie in Abb. 7.1 und der Sender S2 sendet horizontal polarisierte Mikrowellen. Das Empfangshörnchen empfängt die an der Absorberplatine reflektierten Wellen und die Diode misst die Transmission der Wellen durch den Absorber.



F (GHz)	T (%)	R (%)	A (%)
9	67	30	3
9,35	55	3	42
9,5	67	8	25
9,625	36	12	52
9,75	17	26	57
9,875	26	25	49
10	29	25	46
10,25	39	27	34
10,5	63	19	18
10,75	67	14	19
11	76	12	12

Abb. 7.3: ***Eigenschaften des Metamaterialabsorbers*** - *Frequenzabhängigkeit (F) von Absorption (A), Reflexion (R) und Transmission (T).*

Wie man im Diagramm der Abbildung 7.3 erkennen kann, verhält sich der Absorber ideal bei ca. 9,9 GHz.

Die nächste Aufgabe war es nun zu beweisen, dass man die Absorption des Absorbers mit Mikrowellen auch wirklich vergrößern und verringern kann.

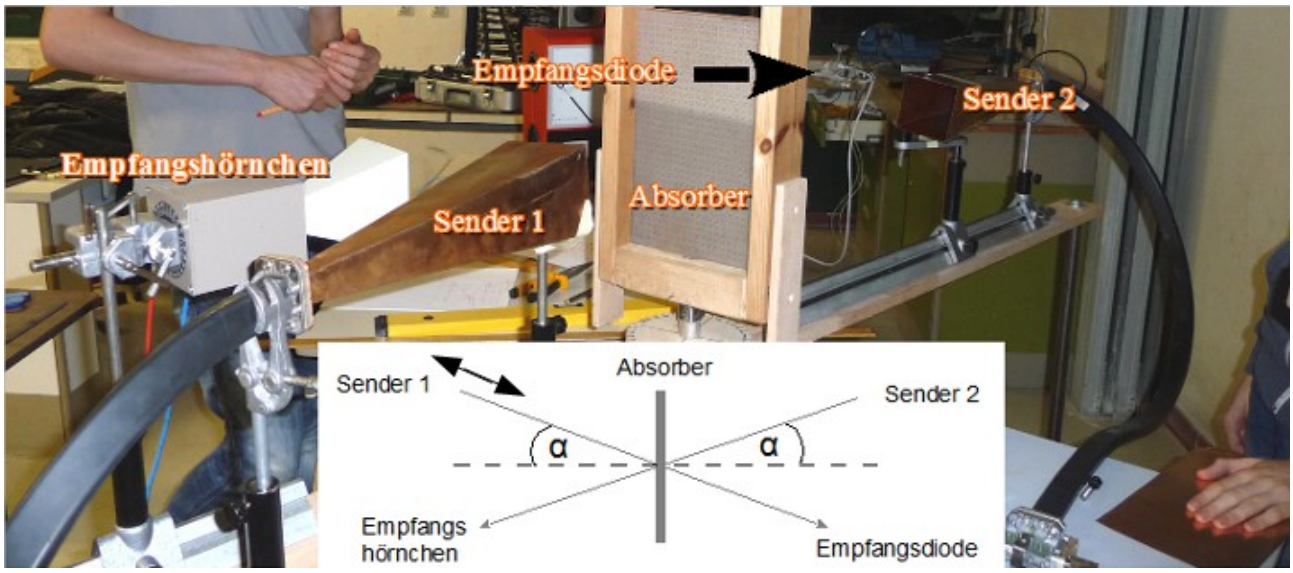
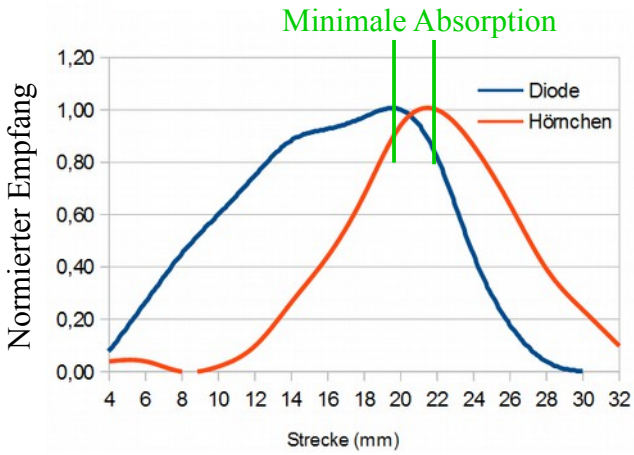


Abb. 7.4: ***Versuch zur phasenabhängigen Absorption*** *– Aufbau zum Messen der Intensität beim Verschieben von Sender 1 relativ zum Metamaterial*

Wir setzten jeweils einen Sender unseren Empfängern gegenüber und stellten das Absorbermaterial in die Wellen in der Mitte des Aufbaus (Abb. 7.4). Nach mehreren Fehlversuchen kamen wir zu der Erkenntnis, dass man die Absorberplatine von der gleichen Seite im gleichen Winkel anstrahlen muss, damit kein Gangunterschied zwischen den beiden Wellen auf der Oberfläche der Absorberplatine entsteht. So erreichten wir, dass sich die ganze Platine z.B. in einem Knoten befindet.

Nun verschoben wir Sender 1 im 2 mm-Takt nach hinten und notierten den Empfang und somit die Intensität die die Wellen haben, wenn sie bei den Empfängern ankommen. Das Ergebnis unserer Messung ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Wie man sieht, gibt es einen Hochpunkt bei ungefähr 20-22 mm (maximalen Empfang, da sich die Absorberplatine in einem Knoten befindet) und sehr geringen Empfang bei 4 mm und 32 mm (Absorberplatine befindet sich in einem Bauch). Erstaunt waren wir, dass wir die eine Sendeantenne um ca. eine Wellenlänge λ und nicht um $\lambda/2$ verschieben mussten, um wieder die gleichen Verhältnisse herzustellen. Anhand von Abbildung 7.6 kann man jedoch leicht nachvollziehen, warum man den Sender um λ verschieben muss, um wieder eine gleiche stehende Welle zu erzeugen.

Als Ergebnis unserer Absorptionsexperimente lässt sich festhalten: Das Absorbermetamaterial absorbiert nur dann nicht, wenn es im Knoten einer stehenden Welle steht. D.h., nur wenn beide Sender senden empfangen die Empfänger den maximalen Wert. Damit ist es uns gelungen mit einem linearen Metamaterial ein AND-Gatter herzustellen, bei dem es möglich ist, eine Welle mit einer Welle zu schalten. Die folgende Tabelle zeigt die Werte, die wir bei diesem Versuch mit dem Metamaterial im Knoten mit dem Hörnchen gemessen haben.



Logikgatter am Knoten (AND-Gatter)

S1	S2	E	Messergebnisse
1	1	1	510 mV
1	0	0	50 mV
0	1	0	50 mV

0	0	0	0 mV

*Abb.7.5: **Welle kontrolliert Absorption** - Empfangsmessungen an Diode und Hörnchen*

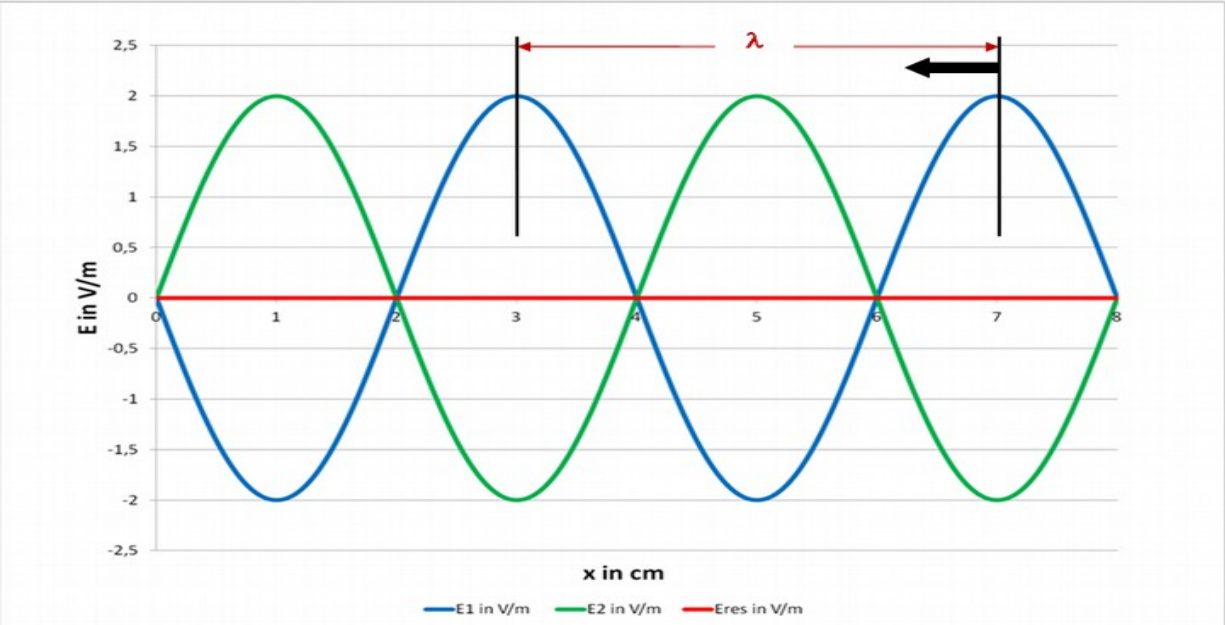


*Abb. 7.6: **Stehende Welle** - Darstellung einer stehenden Welle aus den zwei gegenläufigen Teilwellen grün und blau. Wird eine Welle konstant gehalten, so muss die andere um λ verschoben werden, damit die selbe stehende Welle entsteht.*

7.2 Welle schaltet Wellenausbreitungsrichtung (XOR- und NOT-Gatter)

Als nächsten Versuch wollen wir mithilfe von Wellen die Reflexion und Brechung an einem Metamaterial mit Phasengradient ein- und ausschalten. Nach [4.3] dreht unser in Abbildung 7.7 dargestelltes Metamaterial bei der Reflexion die Polarisation der Welle um 90°. Wir haben durch eine Versuchsreihe vorher noch die optimale Frequenz für dieses Metamaterial (f = 9,75 GHz) und den Reflexions- und Brechungswinkel (α = ca. 20º) ermittelt. Des Weiteren haben wir die Polarisationsebene des Empfängers um 90º gedreht und somit senkrecht zur Polarisationsebene der Sender gestellt. Der Grund dafür ist, dass wir nur so die vom Metamaterial mit dem Winkel α reflektierten und gebrochenen Wellen empfangen.

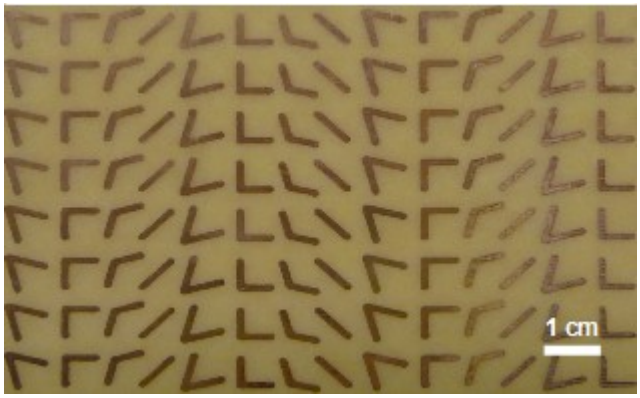


*Abb. 7.7: Unser **Metamaterial mit Phasengradient**, Breite des Bildausschnittes entspricht 11 cm*

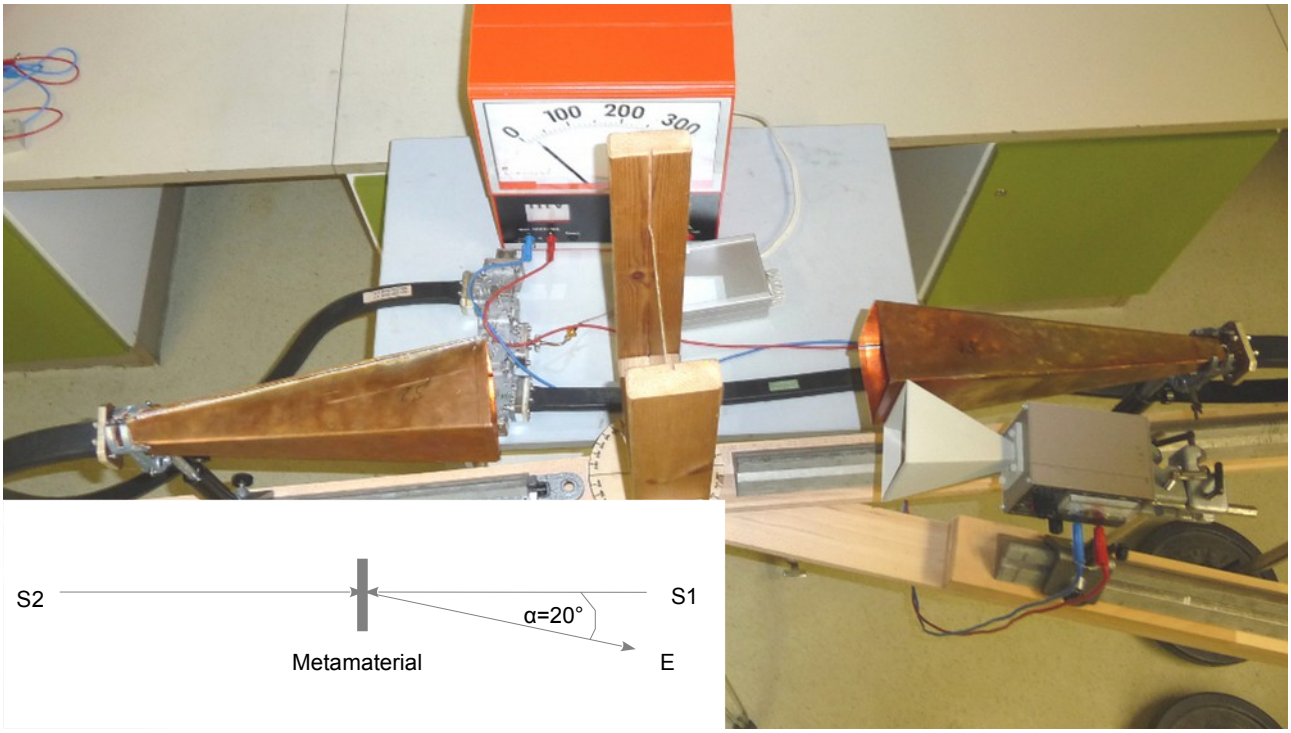


*Abb.7.8: **Versuch zum XOR-Gatter** - Aufbau mit Metamaterial mit Phasengradient (Polarisation der Sender S1 und S2 parallel und des Empfängers senkrecht zur Zeichenebene)*

Wenn sich das Metamaterial an einem Knoten der stehenden Welle befindet, dann kann es nicht mit der Welle wechselwirken und somit auch keine Wellen reflektieren oder brechen. Wie die nebenstehenden Messergebnisse zeigen, ermöglicht dies den Bau eines XOR-Gatters.

S1	S2	E	Messergebnisse
1	1	0	0 mV
1	0	1	500 mV
0	1	1	500 mV
0	0	0	0 mV

Sendet ein Sender, z.B. S1, fortwährend Wellen aus, so erhält man ein NOT-Gatter. Dies haben wir auch in unserer Theorie (Kapitel 5) vorausgesagt.

7.3 Welle schaltet Wellenpolarisation (XOR-Gatter)

In einem weiteren Experiment untersuchten wir, ob man auch ohne Metamaterialien, z.B. mit einem einfachen Hertzschen Gitter unter der Verwendung einer stehenden Welle logische Operationen durchführen kann. Mit einem Hertzschen Gitter kann man die Polarisationsrichtung einer Welle drehen. Wir haben das Hertzsche Gitter in einem 45°-Winkel zur der horizontal liegenden Polarisationsebene der beiden Mikrowellensender aufgestellt. Wir haben entsprechend Abbildung 7.9 die vertikale Polarisation gemessen, sodass nur Wellen empfangen werden, die vom Hertzschen Gitter ausgesendet werden. Wenn das Polarisationsgitter sich in einem Knoten der stehenden Welle befindet, können die Elektronen nicht mit dem elektrischen Feld wechselwirken und somit auch keine Wellen aussenden. Schaltet man jedoch einen der beiden Sender aus, so empfängt der Empfänger E ein Signal (siehe folgende Tabelle). Somit haben wir auch ohne Metamaterialien ein XOR-Gatter gebaut.

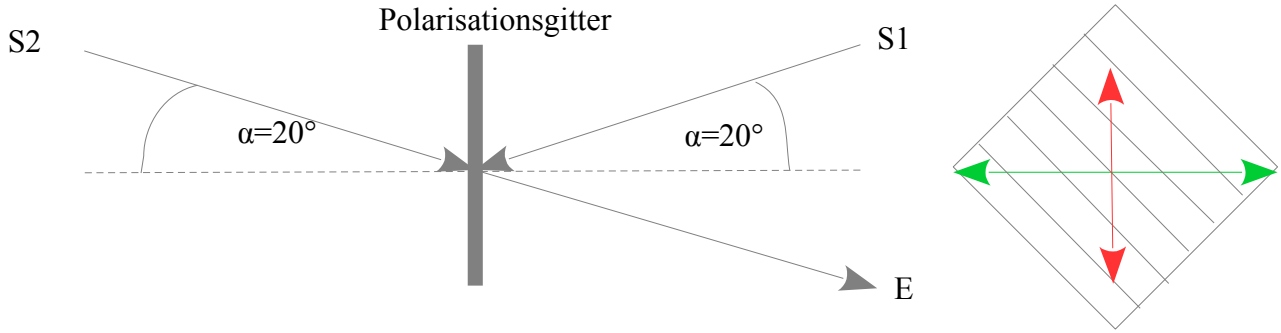


Abb. 7.9: ***Polarisationsexperiment*** *- Versuchsaufbauskizze und Polarisation der Sender (grün) und des Empfängers (rot) von S2 aus betrachtet relativ zum Polarisationsgitter.*

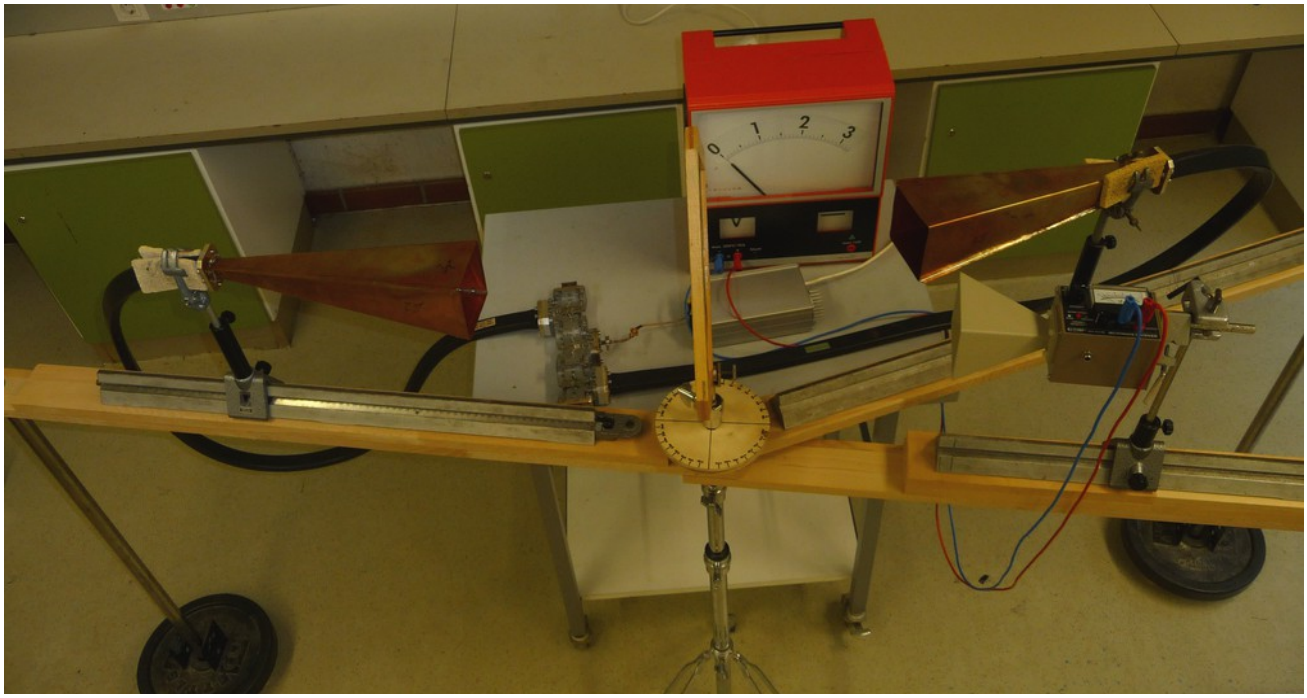


Abb. 7.10: ***Polarisationsexperiment*** *- Versuchsaufbau zum Hertzschen Gitter*

S1	S2	E	Messergebnisse
1	1	0	0 mV
0	1	1	1000 mV
1	0	1	1500 mV
0	0	0	0 mV

7.4 Absorber-Metamaterial im Bauch

Auf der Grundlage unserer theoretischen Überlegungen zu der Wechselwirkung zwischen einer stehenden Welle und einem linearen Material konnten wir eine weitere Wechselwirkung im Bauch der stehenden Welle ableiten. Nach unserer Theorie kommt es durch die Überlagerung der beiden Wellen zu einer doppelten Intensität am Bauch der stehenden Welle, wodurch die Wechselwirkung zwischen dem Material und der Welle auf Grund der erhöhten Energiedichte im Idealfall verdoppelt wird wird. Von dem Metamaterial wird bei einem eingeschalteten Sender 50 % der einfallenden Welle absorbiert, 25 % transmittiert und 25% reflektiert. Man empfängt 25 % der Welle am Empfänger. Wird nun jedoch der zweite Sender

hinzugeschaltet bildet sich die stehende Welle aus und es ist kein Signal am Empfänger mehr messbar. Wir haben somit ein XOR-Gatter gebaut. Um eine einfache destruktive Interferenz hinter dem Material zu widerlegen, wodurch es nur zu einem scheinbaren Anstieg der absorbierenden Wirkung kommt, tasteten wir das elektrische Feld mit einem Dipol ab und konnten feststellen, dass kein Stehwellenfeld vorliegt und somit auch keine destruktive Interferenz herrscht. Somit ist es uns möglich mit nur einem Material sowohl ein AND-Gatter als auch ein XOR-Gatter bzw. NOT-Gatter zu bauen. Somit ist uns auch mit nur einem Material der Bau eines NAND-Gatters möglich.

S1	S2	E	Messergebnisse
1	1	0	0 mV
0	1	1	1200 mV
1	0	1	1000 mV
0	0	0	0 mV

7.5 Interferenz an einer Glasplatte

Bislang basierten unsere Logikgatter immer auf den Effekt der Verstärkung bzw. Abschwächung der Eigenschaften eines linearen Materials mit Hilfe von einer stehenden Welle. Eine weitere Idee von uns war jedoch, mittels einer Glasplatte durch Interferenz Logikgatter zu realisieren. Dazu ersetzen wir unser Absorber-Metamaterial in der 20 Ghz-Apparatur (Abb. 7.11) durch eine Glasplatte und verschoben einen der Sender so weit, bis am Empfänger minimaler Empfang war. Nach ausschalten von einem der Sender war wieder ein deutlich stärkeres Signal zu messen. Unsere Theorie ist, dass 50 % der Welle, die an der Glasplatte reflektiert werden einen Phasensprung von 180° erfahren. Somit entsteht eine Phasendifferenz von 180 Grad zwischen der reflektierten und transmittierten Welle. Somit kommt es zu einer destruktiven Interferenz. Dies entspricht einem XOR-Gatter bzw. einem NOT-Gatter. Verschiebt man nun einen Sender so weit, sodass der Phasensprung von 180° ausgeglichen wird, so kommt es zu einer konstruktiven Interferenz. Die Signale werden hierbei jedoch nur addiert, während es bei unseren Metamaterialien zu einer Vervierfachung der Signalstärke kommt.

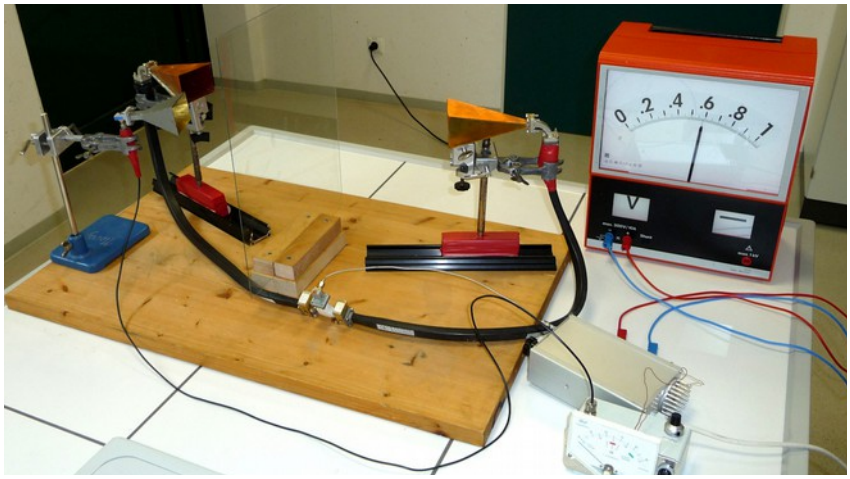


Abb. 7.11: Interferenz an einer Glasplatte mit der 20 GHz-Apparatur

S1	S2	E	Messergebnisse AND
1	1	0	400 mV
0	1	1	140 mV
1	0	1	130 mV
0	0	0	0 mV

S1	S2	E	Messergebnisse XOR
1	1	0	0 mV
0	1	1	360 mV
1	0	1	360 mV
0	0	0	0 mV

8. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Mit unseren Experimenten konnten wir erfolgreich unsere theoretischen Überlegungen und Simulationen bestätigen. Wir können mittels linearer Metamaterialien AND-, NOT- und XOR-Gatter bauen, indem wir mit einer stehenden Welle verschiedene Eigenschaften der Materialien „ein“- und „ausschalten“. Die optische Datenverarbeitung mit linearen Materialien ist so also möglich. Die Simulation des AND-Gatters auf Basis des Absorber-Metamaterials konnten wir experimentell bestätigen. Außerdem sind wir mit einem einfachen Hertzschen Gitter in der Lage, eine logische Operation in einem breiten Frequenzspektrum durchzuführen.

9. Kritische Analyse

Da jedoch auch jede ordentliche Arbeit eine kritische Analyse verdient, haben wir uns überlegt, welche Probleme bei der Weiterführung unseres Projektes auftreten können und wie diese zu lösen sind. Das erste Problem ist, dass bei einer Hintereinanderschaltung von Logikgattern für komplexe Operationen es zu einem Intensitätsverlust kommt. Dies begrenzt die Anzahl der nutzbaren Gatter, da die Intensität nach einer gewissen Anzahl an Gattern zu klein zum Messen wird. Durch Verstärken der Mikrowellen hinter jedem Gatter könnte man dieses Problem lösen. Der Verstärker selbst muss jedoch klein und schnell genug sein, damit sich die optische Datenverarbeitung gegenüber der herkömmlichen lohnt. Dies wäre ein sogennanter rein optischer Verstärker. Ein anderer Lösungsansatz könnte sein, weitere Logikgatter auf Polarisationsbasis zu realisieren, bei denen die Intensität nicht verloren geht, sondern nur die Polarisationsebene der Welle geändert wird. Zum Beispiel könnte die horizontale lineare Polarisation eine logische 1 und die vertikale lineare Polarisation eine logische 0 darstellen. Das zweite Problem ist die noch immense momentane Größe unserer Logikgatter. Unsere 10GHz-Apparatur hat ein Volumen von ca. 12m^3, weshalb es keineswegs möglich wäre, eine Vielzahl von diesen Logikgattern in einer Schaltung zu realisieren. Unsere erste Idee zum Lösen dieses Problems ist, dass man sich die große Apparatur spart und die Metamaterialen direkt in die Hohlleiter einsetzt, sodass man nur noch ein Gebilde aus Hohlleitern hätte. Diese Idee kann man jedoch auch noch weiterentwickeln, denn momentan arbeiten wir noch mit Mikrowellen, welche eine Wellenlänge von 3cm bei der 10 GHz-Apparatur und 1,5cm bei der 20 GHz-Apparatur haben. Wenn man diese Experimente nun stattdessen mit Licht durchführt, was eine Wellenlänge von mehreren hundert Nanometer hat, so sind auch die passenden Metamaterialen entsprechend klein. Um dies ähnlich wie bei den Mikrowellen zu realisieren kann man eine Goldschicht, welche eine Dicke von 50nm hat und damit dünn genug ist um in den Knoten oder den Bauch der stehenden Welle platziert zu werden, auf einen Glasfaserkabel aufdampfen und in den Film dann das entsprechende Muster für das Metamaterial einätzen. Dies ist nicht nur theoretisch möglich, sondern auch technisch realisierbar. Da wir jedoch nur mit schulischen Mitteln arbeiten und uns wir keinen Zugang zu industriellen Fertigungsanlagen haben, können wir dies jedoch nicht bauen.

Mit unseren Forschungen sind wir die erste Gruppe, die im Bereich von Mikrowellen Experimente zur linearen optischen Datenverarbeitung durchgeführt hat. Der Bau eines XOR-Gatters mit Hilfe des Phasengradient-Metamaterials wurde vorher von keiner anderen Forschungsgruppe durchgeführt.

10. Danksagung

Wir bedanken uns besonders bei unseren Betreuungslehrern Frau Veronika Stein und Herrn Walter Stein, die viele Stunden mit uns in der Physik verbracht haben und uns zu jeder Zeit mit ihrem Wissen weiterhelfen konnten. Des Weiteren möchten wir Herrn Dr. Eric Plum vom Optoelectronics Research Centre der University of Southampton für seine sehr fachkundige Unterstützung danken. Weiterer Dank gebührt Herrn Horst Günter Thum, der uns mit seiner Erfahrung und der Zurverfügungstellung eines Frequenzgenerators mit Strahlteiler und zwei flexiblen Hohlleitern sehr konkret geholfen hat.

11. Literatur- und Linkliste

[3.1] Heinrich Gobrecht (Hrsg.) Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Opitk, 6. Auflage, Verlag Walter de Gruyter (1974)

[4.1] Cornelia Denz und Carsten Weilnau Nichtlineare optische Materialien bieten zukunftsweisende Perspektiven für die optische Informationsverarbeitung Physik Journal, Vol. 2, Nr. 10, S. 33 (2001)

[4.2] Jianfa Zhang, Kevin F MacDonald and Nikolay I Zheludev;

Controlling light-with-light without nonlinearity
Light: Science & Applications, Vol. 1, Art. e18 (2012)
doi:10.1038/lsa.2012.18

[4.3] Nanfang Yu, Patrice Genevet, Mikhail A. Kats, Francesco Aieta, Jean-Philippe Tetienne, Federico Capasso, Zeno Gaburro

Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction
Science, Vol. 334, Nr. 21, S. 333 (2011)

[4.4] Jinhui Shi, Xu Fang, Edward T. F. Rogers, Eric Plum, Kevin F. MacDonald, and Nikolay I. Zheludev

Coherent control of Snell's law at metasurfaces
Optics Express, Vol. 22, Nr. 17, S. 21051 (2014);
doi:10.1364/OE.22.021051

[4.5] Gregor Stucke Digitaler optischer Computer
Mannheim; Wien; Zürich: BI-Wissenschaftsverlag (1989)
ISBN 3-411-14111-5

[5.1] http://www.cs.umd.edu/class/sum2003/cmsc311/Notes/Comb/comp.html

[5.2] V. A. Fedotov, M. Rose, S. L. Prosvirnin, N. Papasimakis und N. I. Zheludev

Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry
Physical Review Letters, Vol. 99, Art. 147401 (2007)

[5.3] http://www.ece.utah.edu/~ece6340/LECTURES/lecture%2014/FDTD.pdf

[5.4] CEM Lectures, 8 April 2014, Lecture 10 (FDTD) -- Enhancing 1D FDTD,

https://www.youtube.com/watch?v=ZrgGIkBvbvM

[5.5] Abgeänderte Version der Grafik von User:FDominec unter der Lizenz CC BY-SA 4.0

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FDTD_Yee_grid_2d-3d.svg